

А
172

На правах рукописи

5. Впервые для пихтовых насаждений установлены не только зональные, но и провинциальные закономерности изменения предельных показателей фитомассы, найденных по условию самоизреживания.
6. Экстраполяция фактически данных фитомассы на площадь пихтарников дала дополнительно к традиционному таксационному описанию каждого выдела показатели фитомассы по фракциям. Это составляет основу для картографирования фитомассы на занимаемой пихтой площади.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Фитомасса насаждений *Abies* и *Populus* в связи с континентальностью климата Евразии // Таксация леса на рубеже ХХI века: состояние и перспективы развития (Матер. конфер.).- С.-Петербург: С.-ПбГЛТА, 2001.- С. 54-56 (соавторы В. А. Усольцев, В. А. Азаренок, А. Н. Грибенников).
2. Рекурсивно-блочные модели и география фитомассы лесов // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках.- Вып. 7. (2-я Всероссийская научная интернет-конференция).- Тамбов: ТГУ, 2001.- С. 70-72 (соавторы В. А. Усольцев, В. И. Марковский, А. Н. Грибенников).
3. Количественная и качественная оценка фитомассы деревьев в пихтарниках Урала // Новые технологии и устойчивое управление в лесах Северной Европы (Международная конференция, посвященная 50-летию ЛИФа ПетрГУ).- Петрозаводск, 2001.- С. 122-123. (соавтор Усольцев В. А.).
4. Ход роста фитомассы пихтарников Алтая-Саянской горной провинции // Леса Урала и хозяйство в них.- Вып. 21.- Екатеринбург: УГЛТУ, 2001.- С. 159-170 (соавтор В. А. Усольцев).
5. Составление таблиц биопродуктивности пихтарников Евразии // Биологические ресурсы и устойчивое развитие (Международная научная конференция).- Пущино: Ин-т фундаментальных проблем биологии, 2001.- С. 228-229 (соавтор В. А. Усольцев).
6. Сравнительный географический анализ биопродуктивности ели и пихты в Северной Евразии // Лесная таксация и лесоустройство: Междунар. научно-практич. журнал.- Красноярск: СибГТУ, 2001.- С. 166-171 (соавторы В. А. Усольцев, В. И. Марковский).
7. География фитомассы рода *Abies* Mill. в Северной Евразии // Леса Евразии в третьем тысячелетии: Матер. междунар. конф. молодых ученых.- М.: МГУЛ, 2001.- С. 154-156 (соавтор В. А. Усольцев).
8. Структура надземной фитомассы пихтарников травяно-зеленомошных на Среднем Урале // Лесной комплекс: состояние и перспективы развития. -Сб. научн. статей.-Вып.1.- Брянск: БГИТА, 2001.-С. 29-31 (соавтор В. А. Усольцев).

Антропов Алексей Иванович

Структура и географические закономерности распределения
фитомассы пихтарников
(на примере Северной Евразии)

Специальность 06. 03. 03. - лесоведение, лесоводство;
лесные пожары и борьба с ними

Автореферат
диссертации на соискание ученоей степени
кандидата сельскохозяйственных наук

Екатеринбург 2002

Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ. Заказ № 65. Тираж 120.

Электронный архив УГЛТУ

Работа выполнена в Уральском государственном лесотехническом университете

Научные руководители -

доктор сельскохозяйственных наук,
профессор В. А. Усольцев;
кандидат технических наук,
доцент В. А. Азаренок

Официальные оппоненты -

доктор биологических наук,
профессор С. Г. Шиятов;
кандидат сельскохозяйственных наук,
доцент В. А. Галако

Ведущая организация -

Свердловская лесоустроительная экспедиция

Защита состоится 28 марта 2002 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.281.01 при Уральском государственном лесотехническом университете по адресу: 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского государственного лесотехнического университета.

Автореферат разослан 1 февраля 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор сельскохозяйственных наук, доцент

С. В. Залесов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В последние годы мировое научное сообщество проявляет повышенный интерес к экспериментальным данным о биологической продуктивности лесов в связи с необходимостью оценки их роли в глобальных экологических циклах и стабилизации климата.

Первые попытки районирования территории по продуктивности лесов носили расчетный характер и основывались на учете ведущих климатических характеристик - температуры воздуха и осадков (Paterson, 1956; Weck, 1960). Расчетные данные сопоставляли с фактическими по материалам пробных площадей и, экстраполируя их на всю территорию или отдельные регионы, получали показатели потенциальной продуктивности.

Следующий существенный шаг в районировании биопродуктивности был осуществлен в работах Н. И. Базилевич с коллегами (Родин, Базилевич, 1965; Базилевич, Родин, 1967; Базилевич, 1993) и некоторых зарубежных исследователей (Olson et al., 1983; Kolchugina, Vinson, 1993, и др.), основанных на экстраполяции показателей биопродуктивности растительных сообществ, полученных на ключевых участках, на территорию региона или биома. Данные национальных систем лесоинвентаризации при этом не использовались.

Выполняемые нынче расчеты запасов фитомассы и содержащегося в ней углерода для лесов России и бывшего СССР ведутся путем совмещения экспериментальных данных о фитомассе лесов с базовой информацией Государственного учета лесного фонда (ГУЛФ) и традиционными таблицами хода роста древостоев (ТХР) на основе переводных коэффициентов, либо усредненных по возрастным группам древостоев (Замолодчиков и др., 1998), либо представленных в виде регрессионных зависимостей (Усольцев, 1988, 1998; Швиденко и др., 1999, 2000, 2001). Собранные исследователями базы данных о фитомассе лесов далеко не полны и ограничены пределами бывшего СССР.

Данных о запасах углерода в фитомассе основного его «держателя» – лесного покрова сегодня накоплено уже достаточно, чтобы попытаться свести их в единую базу, дать географический анализ структуры лесной фитомассы и тем самым – исходную основу для многоплановых исследований экологической и биосферной роли лесов. Реализации этой задачи на примере пихтовых лесов Северной Евразии посвящена настоящая работа.

Исследования автора проводились в 2000-2002 гг. в рамках проекта «Региональные закономерности депонирования углерода экосистемами основных лесных формаций России», грант Российского фонда фундаментальных исследований № 00-05-64532 (руководитель проекта – профессор Усольцев В. А.) и ФЦП «Интеграция» на 1997-2001 гг., тема № 32/99 (руководитель проекта – доцент Азаренок В. А.).

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является анализ географических особенностей распределения фитомассы пихтарников по регионам Северной Евразии и описание их посредством многофакторных моделей, совмещенных со средними и предельными возрастными траекториями массообразующих показателей древостоев пробных площадей, с традиционными ТХР пихтарников и с базой данных ГУЛФ, а также изучение структуры надземной фитомассы южнотаежных пихтовых древостоев на Среднем Урале и составление таблиц биопродуктивности путем модификации литературных данных (на примере пихтарников горного Алтая).

В связи с поставленной целью конкретными задачами исследования были:

- изучить особенности структуры надземной фитомассы южнотаежных пихтарников Среднего Урала;
- составить таблицы биопродуктивности пихтарников горного Алтая путем модификации литературных данных;
- на основе собственных и привлеченных экспериментальных данных о фитомассе древостоев выявить зональные и провинциальные закономерности распределения фитомассы пихтарников для фоновых групп типов леса;
- составить таблицы биологической продуктивности пихтарников для разных регионов и установить зональные и провинциальные закономерности ее изменения;
- выявить зональные и провинциальные закономерности изменения предельных показателей фитомассы пихтарников;
- экстраполировать разработанные модели фитомассы на лесопокрытую площадь пихтарников с использованием базы повыделочных данных ГУЛФ одного из лесхозов.

Научная новизна. Впервые изучены особенности структуры надземной фитомассы южнотаежных пихтарников Среднего Урала. Собрана наиболее полная коллекция экспериментальных данных о фитомассе пихты в Северной Евразии, существенно превышающая объем всех известных сводок подобных данных. Это позволило впервые для пихтарников разработать систему региональных многофункциональных моделей фитомассы и проанализировать на их основе географические закономерности распределения ее показателей: а) полученных непосредственно по материалам пробных площадей, б) взятых из составленных таблиц биопродуктивности и в) рассчитанных по предельным густотным траекториям. Впервые для пихтарников выполнена экстраполяция экспериментальных данных их фитомассы на лесопокрытую площадь лесхоза с использованием повыделочных данных ГУЛФ.

Практическая значимость работы состоит в разработке нормативных материалов, необходимых при реализации систем лесохозяйственных

мероприятий, направленных на повышение продуктивности и комплексного освоения пихтовых лесов Северной Евразии. Результаты работы могут быть использованы при разработке лесного кадастра и экологических программ разного уровня, при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем Северной Евразии и оптимизации систем экологизированных рубок по максимуму углерода, депонируемого лесной экосистемой после их проведения.

Разработанные нормативы используются Свердловской лесоустроительной экспедицией Поволжского лесоустроительного предприятия при устройстве пихтовых лесов и для расчета ресурсов древесной зелени (хвойной лапки) и технологической щепы, получаемых при лесопользовании.

Обоснованность выводов и предложений. Использование обширного экспериментального материала и современных методов автоматизированного статистического анализа, системный подход при содержательном анализе объектов исследования и интерпретации полученных результатов, реализация поставленных задач на уровне многофакторных регрессионных моделей, использование современной вычислительной техники и адекватных компьютерных программ определяют обоснованность приведенных в диссертации выводов и предложений.

Личное участие автора. Все работы по теме диссертации от сбора экспериментального материала до анализа и обработки полученных результатов осуществлены автором или при его непосредственном участии.

Апробация работы. Основные результаты исследований изложены на Второй Всероссийской научной internet-конференции, Тамбов, ТГУ, 2001; Международной научной конференции "Биологические ресурсы и устойчивое развитие", Пущино, 2001; Международной конференции, посвященной 50-летию ЛИФа ПетрГУ, Петрозаводск, 2001; научной конференции "Таксация леса на рубеже XXI века: Достижения и перспективы развития", С.-Петербург, 2001; Всероссийской научно-практической конференции "Лесной комплекс: Состояние и перспективы развития", Брянск, 2001.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в восьми печатных работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, состоит из введения, 6 глав, заключения и 6 приложений. Список использованной литературы включает 125 наименований, в том числе 56 иностранных. Текст иллюстрирован 25 таблицами и 27 рисунками.

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Род *Abies* Mill. расчленяется на 52 вида, из которых наиболее распространены в Евразии три: сибирская (*A. sibirica* Ldb.), белая (*A. alba* Mill.)

и белокорая (*A. nephrolepis* (Trautv.) Maxim.) пихты (Бобров, 1978). Типичная представительница темнохвойных лесов и повсеместная спутница ели, пихта, тем не менее, имеет свою специфическую историю происхождения, Ф. Т. Кеппен (1885) исходной областью пихты белой считает Алтай или смежные с ним хребты, откуда первоначальная ее форма еще в третичную эпоху распространилась на юго-запад и вдоль высоких горных цепей прошла в Малую Азию. На Кавказе она сформировала новый вид – пихту кавказскую *A. nordmanniana* (Stev.) Spach. – ныне «предмет удивления и восторгов лесоводов всей Европы» (Арнольд, 1898, с. 463), из Малой Азии перешла на Балканы, Альпы и Карпаты и далее – на Апennины и Пиренеи. Наиболее обширным ареалом, простирающимся от бассейна Северной Двины на западе до верховьев Алдана на востоке, обладает пихта сибирская. Локальные ареалы имеют дальневосточные пихты: сахалинская (*A. sachalinensis* Fr. Schmidt), цельнолистная (*A. holophylla* Maxim.), сильная (*A. firma* Sieb. et Zucc.), Вича (*A. veitchii* Lindl.), Майра (*A. mayriana* Miyabe et Kudo), Мериса (*A. mariesii* Mast.), а также пихта Семенова (*A. semenovii*) на Тянь-Шане. В главе описаны экология и некоторые географические аспекты продуктивности рода *Abies* в Северной Евразии.

Представление о географической природной зональности было сформулировано В. В. Докучаевым в начале XX века. Он впервые выделил зоны климата и растительности в широтном направлении и провинции – в меридиональном, а также выдвинул концепцию горизонтальных и вертикальных зон природы (Докучаев, 1948). Затем это представление получило дальнейшее развитие в трудах российских ученых как основополагающее обобщение физической географии (Герасимов, 1945; Григорьев, Будыко 1956; Назимова и др., 1983; Герасимов, Зимина, 1986).

Уровень ФАР по зональному градиенту и континентальность климата – по провинциальному являются основными характеристиками последнего, определяющими биопродукционный потенциал растительного покрова (Григорьев, Будыко, 1956; Базилевич, Родин, 1967; Назимова, 1994, 1998). Известные (около 20) индексы континентальности климата обычно включают в себя величину годовой амплитуды температуры в абсолютном или относительном выражении и имеют общую тенденцию нарастания в направлении от океанических побережий внутрь евразийского континента с полюсом континентальности в районе Верхоянска (Gorczynski, 1920; Conrad, 1946; Иванов, 1953; Полозова, 1954; Хромов, 1957, и др.). Если по зональному градиенту наличие профиля продуктивности лесного покрова (Лавренко с соавт., 1955, и др.) сегодня общеизвестно, то в изменении производительности лесного покрова по провинциальному градиенту имеется пока полная неопределенность, а иногда предлагаются взаимоисключающие закономерности (Курнаев, 1973; Тябера, 1988).

По причине малочисленности экспериментального материала анализ географии биопродуктивности растительности обычно выполняется

расчетным путем, без использования математико-статистических методов. Обсуждая возможные варианты обработки результатов измерений, В. Н. Тутубалин с соавт. (1999) полагают наиболье приемлемым метод наименьших квадратов, в частности, регрессионный анализ, позволяющий извлечь дополнительную информацию из данных, причем недорогой ценой – используя стандартные программы. Этот «метод века» (Дрейпер, Смит, 1987), в отличие от имитационного моделирования, при описании изменчивости фитомассы растительного покрова и ее географии входит составной частью в понятие «моделирования структурно-функционального состояния» (Новик и др., 1986) как метод «пассивного (т.е. непланируемого) эксперимента» (Налимов, 1994). В наиболее завершенном виде методология многофакторного регрессионного моделирования структуры и географии фитомассы лесов с применением рекурсивного принципа и блоковых фиктивных переменных представлена в монографиях В. А. Усольцева (1985, 1988, 1997, 1998).

Традиционная процедура, связанная с работой на пробных площадях, фракционированием, взвешиванием и сушкой фитомассы модельных деревьев, требует довольно длительного времени и больших затрат. В итоге таблицы биопродуктивности на сегодня составлены лишь в отдельных регионах для некоторых пород, тогда как ими должны быть охвачены все регионы страны и все лесообразующие породы по аналогии с традиционными ТХР древостоеев. Необходимость расчета углерододепонирующей функции лесов и все возрастающая потребность в таблицах биопродуктивности насаждений побуждают использовать все имеющиеся данные о фитомассе. Опыт составления таблиц биопродуктивности по данным о фитомассе, опубликованным, но не доведенным исследователями до уровня норматива, изложен В. А. Усольцевым (2001а,б) на примере лиственников и кедровников.

Количественные методы оценки предельно возможной биопродуктивности лесных экосистем, необходимые как для расчета потенциально возможного стока атмосферного углерода, так и при оптимизации лесохозяйственных мероприятий, на сегодня не разработаны. Только за счет повышения густоты насаждений при прочих равных условиях можно удвоить производительность наших лесов по сравнению с нынешним наличным запасом (Бузыкин, 2001). Предельные показатели фитомассы лесных экосистем имеют региональные (климатические, эдафические) особенности, а в пределах региона опосредуются морфоструктурой древостоя и могут быть описаны совокупностью массообразующих таксационных показателей. Показано, что оптимальная траектория фитомассы древостоя не тождественна предельной: первой из них соответствует запас фитомассы, максимальный для данного возрастного диапазона в статистике при соответствующих (оптимальных) густотах, а вторая при тех же густотах сдвинута в сторону больших запасов и больших классов возраста, характеризуя тем са-

мым положение линии самоизреживания и соответственно - верхний предел продуктивности (Усольцев, 1985, 1988, 1998; Кофман, Гуревич, 2001).

В применяемых методах экстраполяции экспериментальных оценок фитомассы на тот или иной регион массообразующие показатели древостоя учитываются лишь частично, обычно в количестве 1-2 факторов (Замолодчиков и др., 1998; Lakida et al., 1997). Даже многофакторные регрессионные модели по определению дают смещения оценок в силу невозможности учесть все действующие факторы (Налимов, 1994). Экстраполяция же на лесопокрытую площадь единичных либо усредненных по группам возраста определений фитомассы дает по некоторым регионам смещения до 50 % (Усольцев, 1998). Необходимо совершенствование методики на основе совмещения с повыдельными банками данных ГУЛФ многофакторных моделей фитомассы.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНОВ И ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования структуры фитомассы пихтарников выполнены на территории восточной части Нижнесергинского лесхоза Свердловской области, входящей в подзону южной тайги (57° с. ш., 59° в. д.). Приведена краткая природная характеристика района исследования, описаны климат, рельеф и почвы, характеристика лесного фонда.

Изучены пихтарники травяно-зеленомошные одного возрастного ряда на 5 пробных площадях (табл. 1). Взято 87 модельных деревьев по ступеням толщины стволов. У 18 деревьев взято 75 навесок для определения доли хвои в охвоенных ветвях (ДЗ) и содержания абсолютно сухого вещества в хвое и ветвях, а также сделано 132 выпила стволов для определения объема стволов и базисной плотности в древесине и коре. Фактические значения фитомассы пихтарников в количестве пяти пробных площадей разного возраста включены в базу данных в качестве биопродукционной характеристики подзоны южной тайги Уральской провинции.

Таблица 1
Характеристика пробных площадей, заложенных в пихтарниках
травяно-зеленомошных подзоны южной тайги Свердловской области

Состав	Воз- раст, лет	Бо- ни- тет, экз./ га	Густо- та, шт./ га	Ср. диа- метр, см	Ср. вы- со- та, м	Пол- но- та	Запас, м ³ /га	Фитомасса, т/га				
								Стволы	Ве- тви	Хвоя	Ито- го	
								Все- го	Ко- ра			
8П2Е	20	V	54082	1,6	2,2	1,0	31,9	14,9	2,74	9,5	9,1	33,5
8П2Е	32	IV	4100	6,7	5,9	1,0	53,7	24,2	3,43	11,1	11,7	47,0
9П1Е	57	V	4900	9,2	8,4	1,0	153	58,8	7,63	12,5	12,9	84,2
3П5Е2Б	72	III	1778	18,2	18,6	1,0	396	141,3	16,0	16,0	8,4	165,7
7П2Е1Б	73	III	1480	19,9	18,4	1,0	390	139,2	16,3	10,5	12,0	161,7

База данных о фитомассе лесов дает уникальные возможности для анализа географии продуктивности лесных экосистем. Если первые попытки географического анализа продуктивности растительного покрова были ограничены по своим возможностям из-за малого числа количественных определений фитомассы – всего 150 пробных площадей (Родин, Базилевич, 1965), то собранная нами база данных только для рода *Abies* Северной Евразии включает в себя 221 (включая собственные) определение фракционного состава фитомассы, которые сопровождаются полной таксационной и частично лесотипологической характеристиками и взяты из 44 литературных источников.

Упомянутый массив включает в себя: 23 определения для *A. alba* (Средне-Европейская провинция, подзона широколиственных лесов), 134 – для *A. sibirica* (провинции: Восток Русской равнины, подзона хвойно-широколиственных лесов; Уральская, подзона южной тайги; Западно-Сибирская, подзоны средней и южной тайги; Средне-Сибирская, подзона южной тайги; Алтае-Саянская, подзоны южной тайги и лесостепи и Забайкальская, подзона южной тайги), 12 – для *A. nephrolepis* (Дальний Восток, подзоны южной тайги и хвойно-широколиственных лесов в Приморье), 8 – для *A. sachalinensis* (Япония, подзона средней тайги на о. Хоккайдо), 28 – для *A. veitchii* (Япония, подзона хвойно-широколиственных лесов на о. Хонсю), 11 – для *A. firma* (Япония, субтропики на юге о. Хонсю) и 5 – для *A. nordmanniana* (Причерноморская провинция, Кавказ). Около 60 % данных о фитомассе рода *Abies* относится к пихте сибирской. Остальные виды характеризуют лишь ограниченные регионы.

Экспериментальные данные после нанесения на схему зонально-провинциального деления территории (Базилевич, Родин, 1967; Курнаев, 1973; Смагин и др., 1978) распределились по 15 регионам.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

На основе маршрутного обследования района исследований подобраны участки насаждений, на которых закладывали пробные площади согласно ОСТ 56-69-83 «Пробные площади лесоустроительные». На пробных площадях выполняли сплошной перечет деревьев по элементам леса и ступеням толщины с замером высот у 15-20 растущих деревьев. В августе взяты модельные деревья по ступеням толщины. После рубки измерялись протяженность всего ствола и его бессучковой части, диаметр ствола у основания кроны. Ствол делили на секции длиной 0,5 или 1,0 м в зависимости от его размеров. На середине секций и на высоте груди определяли диаметры ствола в коре. В каждом сечении выпиливали шайбу, отделяли кору, взвешивали отдельно древесину и кору до и после сушки до абсолютно сухого состояния. Все отрубки ствола взвешивали с точностью 50 г.

По полученным данным рассчитывали массу древесины и коры отрубков в свежем и сухом состояниях, общую массу и базисную плотность ствола. Возраст устанавливался по числу годичных слоев на пне.

После обрубки крону делили вдоль по стволу на пять равных секций и каждую взвешивали с точностью 50 г на весах грузоподъемностью 20 кг. У каждой секции секаторами отделяли древесную зелень – охвоенные побеги толщиной 0,4-0,8 см и оставшийся скелет кроны вновь взвешивали. Доля хвои в древесной зелени определялась по навескам, взятым в средней части каждой секции кроны, и по ним рассчитывалась масса хвои всего дерева. Перевод на абсолютно сухое состояние выполнен по пробным навескам хвои и ветвей. Регрессионным методом рассчитан полный фракционный состав надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии на 1 га (см. табл. 1).

4. ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОМАССЫ ПИХТАРНИКОВ ПО РЕГИОНАМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Структура надземной фитомассы пихтарников в подзоне южной тайги на Среднем Урале и ее особенности. Анализ связи показателей, определенных по навескам из кроны и выпилам из стволов модельных деревьев пихты в условиях Нижнекергинского лесхоза, с легко измеряемыми признаками деревьев выявил наличие следующих зависимостей:

$$\%ДЗ = 103,3 + 3,3655d - 4,8586h; R^2 = 0,598; \quad (1)$$

$$S_{sw} = 0,4100 - 0,0268d + 0,0292h; R^2 = 0,803; \quad (2)$$

$$S_{sb} = 0,4210 - 0,0280d + 0,0266h; R^2 = 0,510; \quad (3)$$

где $\%ДЗ$, S_{sw} и S_{sb} – соответственно процент древесной зелени в кроне, содержание сухого вещества в древесине ствола и содержание сухого вещества в коре ствола, в долях единицы; d и h – соответственно диаметр на высоте груди (см) и высота ствола (м). Все константы уравнений, приведенных здесь и далее, значимы на уровне $t_{0,05}$ и выше. Уравнения (1)-(3) действительны при $d > 2$ см и $h > 2$ м. Варьирование $\%ДЗ$, S_{sw} и S_{sb} объясняется толщиной и высотой ствола соответственно на 60, 80 и 51 %, а их средние значения составляют соответственно 0,93; 0,44 и 0,42.

Для содержания сухого вещества в хвое, неохвоенных ветвях и ДЗ, а также для доли хвои в ДЗ установить достоверную связь с возрастом, диаметром и высотой дерева не удалось. Выведены средние значения показателей, соответственно 0,43; 0,45; 0,50 и 0,55. Доля хвои в ДЗ оказалась мало изменчивой, а ее среднее значение (0,55) – значительно ниже, чем было установлено Л. К. Поздняковым с соавт. (1969) для пихты в Саянах (0,67).

В уравнениях для оценки фитомассы деревьев и древостоев в качестве регрессоров используются легко измеряемые массообразующие показа-

тели соответственно деревьев либо древостоев. Нами применена двухфакторная линеаризованная зависимость

$$\ln p_i = a_0 + a_1 \ln h + a_2 \ln d + a_3 \ln h \ln d, \quad (4)$$

где p_i – масса фракции дерева (ствол, хвоя, ветви) в абсолютно сухом состоянии, кг. Для массы ствола без коры ($p_{б/к}$) в структуру уравнения (4) дополнительно введен показатель массы ствола в коре ($p_{в/к}$) с целью исключения возможных смещений в оценке доли коры в стволах. После исключения статистически не значимых переменных уравнение имеет вид:

$$\ln p_{б/к} = a_0 + a_2 \ln d + a_4 \ln p_{в/к}. \quad (5)$$

Результаты обработки уравнений (4) и (5) приведены в таблице 2.

Таблицы фитомассы деревьев пихты составлены на основе уравнений табл. 2 в двух вариантах: по схеме баварских объемных таблиц (табл. 3) и путем совмещения уравнений со шкалой разрядов высот (табл. 4), разработанной для пихтарников горного Урала (Лесотаксационный справочник..., 1991).

Таблица 2

Зависимая переменная $\ln p_i$ для:	Константы и независимые переменные					R^2	SE^*
	a_0	$a_1 \ln h$	$a_2 \ln d$	$a_3 \ln h \ln d$	$a_4 \ln p_{в/к}$		
стволов в коре	-1,5619	0,5105	0,5283	0,3652	-	0,996	0,124
стволов без коры	-0,2976	-	0,0958	-	0,9743	0,999	0,029
хвои	-0,8165	-1,1925	1,1276	0,3849	-	0,923	0,371
ветвей	-0,9299	-1,1333	1,2447	0,3630	-	0,916	0,403

*SE – стандартная ошибка уравнения

Данные табл. 3 и 4 подтверждают установленную ранее (Усольцев, 1985) закономерность, согласно которой у деревьев одного и того же диаметра по мере снижения высоты дерева масса кроны возрастает, но только для ступеней толщины стволов от 8 до 20 см. При больших диаметрах стволов фитомасса кроны и при всех диаметрах – масса стволов возрастают по мере увеличения высоты дерева. Это свидетельствует о различиях в формировании фитомассы ствола и кроны у деревьев различных размеров. Поэтому использование в качестве регрессора так называемого видового цилиндра d^2h оправдано лишь при оценке массы стволов, но неприемлемо для оценки массы кроны.

Анализ структуры фитомассы пихтарников на уровне древостоя, чи- словые значения которой приведены в табл. 1, показывает, что варьирование производительности (от III до V классов бонитета) и показателей фитомассы (от 34 до 166 т/га) древостоев даже в близких условиях произра- стания довольно значительное. Несмотря на это, имеется достоверная по- ложительная связь надземной фитомассы, в том числе массы стволов, с возрастом – r равен соответственно 0,96 и 0,95. Для массы ветвей назван-

Таблица 3.

Таблица для оценки фитомассы (кг) деревьев пихты южной тайги на Среднем Урале по высоте и диаметру ствола

Высота дерева <i>h</i> , м	Диаметр ствола <i>d</i> , см						
	8	12	16	20	24	28	32
Фитомасса ствола в коре							
Фитомасса хвои							
4	3,7	5,6	-	-	-	-	-
8	8,8	14,9	21,5	-	-	-	-
12	-	26,4	39,9	55,0	71,5	-	-
16	-	-	61,9	87,3	115,6	147	-
20	-	-	-	-	167,9	216	268
24	-	-	-	-	-	370	452
							540
Фитомасса ветвей							
4	2,7	5,2	-	-	-	-	-
8	2,0	4,5	7,8	-	-	-	-
12	-	4,0	7,4	11,8	17,2	-	-
16	-	-	7,1	11,6	17,3	24,3	-
20	-	-	-	-	17,5	24,8	33,6
24	-	-	-	-	-	34,5	45,5
							58,3
4	3,1	6,3	-	-	-	-	-
8	2,4	5,4	9,6	-	-	-	-
12	-	4,9	9,1	14,7	21,7	-	-
16	-	-	8,7	14,5	21,8	30,9	-
20	-	-	-	-	21,9	31,4	42,8
24	-	-	-	-	-	43,8	58,1
							74,9

Таблица 4

Таблица для оценки фитомассы деревьев пихты южной тайги на Среднем Урале, совмещенная со шкалой разрядов высот

Диаметр <i>d</i> , см	Высота ствола <i>h</i> , м	Фитомасса в абсолютно сухом состоянии, кг			
		Ствол в коре	Ствол без коры	Хвоя	Ветви
Разряд высот II					
8	9,2	10,5	9,0	1,93	2,27
16	16,3	63,7	55,5	7,10	8,73
24	21,6	190,9	168,0	17,49	21,94
32	25,1	400,8	355,8	34,72	44,08
40	26,8	662,3	593,0	59,78	76,57
48	27,0	920,9	832,0	92,69	119,67
Разряд высот III					
8	8,3	9,2	7,9	2,01	2,36
16	14,7	54,4	47,6	7,19	8,85
24	19,4	159,6	141,1	17,43	21,89
32	22,5	330,0	294,4	34,19	43,48
40	24,1	543,7	489,3	58,36	74,91
Разряд высот IV					
8	7,4	8,0	6,9	2,10	2,46
16	13,0	45,1	39,6	7,30	8,99
24	17,3	131,8	117,1	17,37	21,84
32	20,1	270,1	242,2	33,65	42,87
40	21,5	439,8	397,9	56,86	73,17

ная связь также положительная, но менее тесная – $r = 0,62$, а для массы хвои – не достоверная. Доля хвои в кроне (%FC) не обнаруживает достоверной связи с возрастом или иными морфометрическими показателями древостоев и в среднем равна 48 %. Процент хвои в надземной фитомассе (%FA), напротив, тесно связан с возрастом древостоя (*A*, лет) в диапазоне от 20 до 73 лет уравнением

$$\%FA = 36,8 - 0,411A; R^2 = 0,969. \quad (6)$$

Средние показатели фитомассы пихтарников Урала (куда включена также пробная площадь, заложенная в пихтово-осиновом молодняке Уфимского плато Р. И. Ханбековым, 1972) сопоставлены со средними показателями пихтовых древостоев других регионов, взятыми из 32 литературных источников (табл. 5). Возраст древостоев – 20–140 лет.

Данные таблицы 5 дают предварительную ориентировочную характеристику как пихты сибирской в сопоставлении ее по регионам, так и различных видов рода *Abies* по разным регионам. Среди *A. sibirica* наибольшими запасами хвои характеризуются пихтарники Урала (10,8 т/га), а по регионам Сибири масса хвои меньше и составляет от 6,3 до 7,9 т/га (в

Электронный архив УГЛТУ

среднем 7,2 т/га). Наибольшей массой хвои отличаются пихта белая в Средней Европе (13,2 т/га) и пихты, произрастающие на Японских островах (12,3-18,2 т/га). Однако охвоенность крон (процент массы хвои в массе кроны) -наибольшая на Урале (48 %), в Сибири она составляет в среднем 38 %, в Японии – 37%, изменяясь в последнем случае у разных видов пихты от 28 до 46 %. Доля хвои в надземной фитомассе в пределах ареала пихты сибирской примерно одинаковая на Урале и в Забайкалье (10-11 %), в Сибири – несколько ниже (7 %), а наибольший показатель - у пихты белой в Средней Европе (34 %). Японские пихты по данному показателю практически не отличаются от пихты, произрастающей в Сибири.

Таблица 5

Средние показатели фитомассы пихтарников по регионам Евразии

Регион	Вид <i>Abies</i>	n*	Надземная фитомасса, т/га			%FC	%FA
			Стволы	Хвоя	Ветви		
Урал	<i>A. sibirica</i>	6	76	10,8	11,9	98,4	48
Западная Сибирь	<i>A. sibirica</i>	11	96	7,9	13,0	116,9	38
Средняя Сибирь	<i>A. sibirica</i>	19	77	7,2	11,3	95,5	39
Алтай и Саяны	<i>A. sibirica</i>	62	70	6,3	11,0	87,3	36
Забайкалье	<i>A. sibirica</i>	10	51	7,2	10,7	68,9	40
Средняя Европа	<i>A. alba</i>	23	223	13,2	26,1	262,3	34
Япония	<i>A. sachalinensis</i>	8	73	12,3	25,5	110,8	33
Япония	<i>A. veitchii</i>	28	81	12,4	14,3	107,7	46
Япония	<i>A. firma</i>	11	219	18,2	46,4	283,6	28

*Число пробных площадей.

Составление таблиц биопродуктивности пихтарников Алтай-Саянской провинции путем модификации литературных данных. В чистых пихтарниках черневой тайги Алтая в возрасте от 60 до 200 лет с I классом бонитета была определена масса ДЗ на 43 пробных площадях со взятием по ступеням толщины 537 модельных деревьев. Исходные данные тахсации и массы ДЗ (т/га) опубликованы (Ефимович, Никитин, 1934). Тридцатью годами позже в тех же лесхозах в аналогичных пихтарниках было исследовано накопление массы крон, древесины и коры стволов на 33 пробных площадях и со взятием 157 модельных деревьев (Золотухин, 1963). Древостои представлены в возрастном диапазоне 44 – 150 лет с полнотой 0,5 - 0,8. Однако эти исходные данные фитомассы не опубликованы и представлены в виде графиков зависимости массы кроны и ДЗ (т/га) от возраста древостоев для II-IV классов бонитета отдельно. Мы привели их к относительной величине - проценту ДЗ в кроне (%ДЗ), инвариантному по классам бонитета, связали его с возрастом древостоя (A) зависимостью

$$\%ДЗ = \exp(4,8616 - 0,1880 \ln A); \quad R^2 = 0,866 \quad (7)$$

и с помощью последней восполнили недостающие данные по скелету крон в материалах Е. А. Ефимовича и К. Е. Никитина.

Для вычленения массы хвои из массы ДЗ пихты использован коэффициент доли хвои (0,67), а для приведения массы хвои и скелета кроны к сухому состоянию – коэффициенты соответственно 0,44 и 0,50, выведенные Л. К. Поздняковым (1985) для пихтарников Западного Саяна. По доле коры в запасе стволовой древесины (Золотухин, 1963) и условной плотности древесины и коры соответственно 0,350 и 0,330 т/м³ (Поздняков, 1985) рассчитана масса древесины и коры стволов в абсолютно сухом состоянии. Полученные значения фитомассы (древесины и коры стволов, хвои и ветвей) пихтарников Алтая-Саянской горной провинции в количестве 43 определений включены в базу данных в качестве биопродукционной характеристики подзоны южной тайги Алтая-Саянской горной провинции.

Упомянутые 43 определения фитомассы использованы для составления таблиц биопродуктивности пихты Алтая-Саянской горной провинции с привлечением данных о фитомассе корней и нижних ярусов в количестве 20 пробных площадей (Поздняков, 1975; Кузиков, 1979; Ермоленко, 1982, 1983). По итоговому массиву данных фитомассы 96 пробных площадей рассчитаны многофакторные регрессии общего вида:

$$P_i/M \text{ или } P_i = f(A, D, H, N, M), \quad (8)$$

где P_i - фитомасса i -й фракции (P_S , P_{SB} , P_F , P_B , P_R и P_U – соответственно стволов с корой, коры стволов, хвои, ветвей, корней и нижних ярусов растительности) в абсолютно сухом состоянии (т/га); D и H – соответственно средние диаметр (см) и высота древостоя (м); N – число стволов на 1 га, тыс. экз./га; M – запас, м³/га. Изменчивость фракций фитомассы объясняется уравнениями (8) на 71,6–99,7 %, за исключением фитомассы нижних ярусов (33,5 %). Путем их табулирования по значениям A , H , D , N и M из ТХР пихтарников горного Алтая (Хайтович, 1965), получена таблица биопродуктивности, фрагмент которой для злаково-разнотравного типа леса приведен ниже (табл. 6).

Таблица 6
Возрастная динамика абсолютно сухой фитомассы пихтарников Алтая-Саянской горной провинции, I класс бонитета

A, лет	H, м	D, см	N, экз./га	M, м ³ /га	Фитомасса, т/га						
					P_S	P_{SB}	P_F	P_B	P_R	P_U	Всего
20	6,7	7,5	4140	67	23,7	5,3	1,6	1,5	4,6	3,0	34,4
40	13,4	14,8	1510	174	59,9	9,7	7,0	7,3	11,4	4,0	89,6
60	20,3	25,7	769	319	109,4	14,9	9,6	11,5	14,8	5,5	150,8
80	25,7	33,0	448	431	145,9	16,7	11,8	18,8	22,7	7,4	206,6
100	29,9	39,0	354	529	178,3	19,1	11,4	21,2	26,6	10,0	247,5
120	32,2	42,5	316	593	199,5	20,6	10,0	21,4	28,8	13,5	273,2

Модели распределения фитомассы пихтарников по регионам Северной Евразии. Упомянутые 15 регионов закодированы блоковыми фиктивными переменными X_0, \dots, X_{14} (Дрейпер, Смит, 1973), включенными в уравнения вида (8) с целью установления степени «дистанцирования», или отличия показателей фитомассы каждого региона от исходного, соответствующего *A. alba* в подзоне широколиственных лесов Центральной Европы. Эти отличия характеризуются константами при блоковых переменных соответствующих регионов в многофункциональных уравнениях

$$\ln(P_i/M) \text{ или } \ln P_i = f(X_0, \dots, X_{14}, \ln A, \ln H, \ln D, \ln N, \ln M). \quad (9)$$

Включенные в уравнения (9) переменные объясняют 83-99 % изменчивости фитомассы. Для получения запасов фитомассы в том или ином регионе необходимо задать набор массоопределяющих показателей A, H, D, N и запасов M , характерный для региона или его части.

Поскольку продуктивность насаждения определяется в первую очередь по соотношению его возраста и высоты, в качестве базовой принята зависимость *высота ~ возраст*. Используемый рекурсивный принцип моделирования обеспечивает последовательное накопление региональных различий в возрастной динамике массообразующих показателей и запасов стволовой древесины по цепочке взаимозависимых уравнений:

$$\ln H = f(X_0, \dots, X_{14}, \ln A) \rightarrow \ln D = f(X_0, \dots, X_{14}, \ln A, \ln H) \rightarrow$$

$$\rightarrow \ln N = f(X_0, \dots, X_{14}, \ln A, \ln H, \ln D) \rightarrow \ln M = f(X_0, \dots, X_{14}, \ln H, \ln D, \ln N). \quad (10)$$

Независимые переменные уравнений (10) объясняют 89-95 % изменчивости массообразующих показателей и запаса стволов. Если с помощью системы уравнений (9) оцениваются региональные различия в структуре фитомассы при условии равенства массообразующих показателей, то система (10) обуславливает региональные различия самих массообразующих показателей, накапливая вклад каждого из них в конечный результат – запас стволов.

Последовательным табулированием рекурсивных систем уравнений (10) и (9) по задаваемым значениям возраста получены возрастные тренды всех массообразующих показателей и запасов фитомассы по фракциям (стволы, ветви, хвоя, корни, нижние ярусы) для каждого региона. Накопление запасов фитомассы в насаждениях пихты происходит на всем исследованном возрастном интервале от 10 до 260 лет: в 20 лет запасы фитомассы составляют 32-33 %, в 40 лет – 57-58 %, в 60 лет – 75-76 % и в 260 лет 137-138 % к запасам в возрасте 100 лет. Наибольшие запасы массы хвои приходятся на возраст 80 лет во всех регионах независимо от степени жесткости климатических условий. В работе приведены таблицы возрастных трендов фитомассы по регионам Северной Евразии, которые можно рассматривать в качестве специфичных характеристик разных видов *Abies* и использовать для сопоставления их биопродуктивности (фрагмент одной из них см. в табл. 7).

Таблица 7
Фрагмент таблицы возрастных трендов фитомассы для подзоны южной тайги в Уральской провинции

Возраст лет	Средняя высота м	Средний диаметр см	Число стволов, экз/га	Запас стволов, м ³ /га	Фитомасса, г/га				
					Стволы		Хвоя	Ветви	Надземная
					Всего	Кора			
20	4,2	3,9	16297	65,0	26,0	4,5	8,3	7,9	42,2
60	11,6	11,8	2860	183,9	73,8	9,8	10,5	14,2	98,5
100	16,4	18,3	1360	248,2	100,5	12,1	10,2	16,5	127,2
140	19,8	23,9	848	285,3	116,5	13,3	9,6	17,5	143,6
180	22,2	28,5	612	305,4	125,7	13,9	9,0	17,8	152,5

Таблица 9
Фрагмент таблицы биопродуктивности пихты сибирской, совмещенной с ТХР нормальных пихтарников Уфимского плато (Башкирия) IV класса бонитета (Лесотаксационный справочник..., 1991)

Возраст лет	Высота м	Диаметр см	Сумма площадей сечений, м ² /га	Число стволов, экз/га	Запас, м ³ /га	Фитомасса, г/га				
						Ствол в коре	Кора в коре ствола	Хвоя в ветви	Надземная	Корни
70	12,8	13,3	31,4	2259	190	76,6	9,9	9,89	14,2	100,7
80	14,2	16,0	33,6	1672	220	88,3	11,0	10,5	15,9	114,7
90	15,6	18,5	35,8	1331	252	101,0	12,1	11,0	17,6	129,7
100	16,7	20,7	37,4	1113	279	111,8	13,1	11,4	19,0	142,2
110	17,7	22,6	38,8	965	303	121,5	13,9	11,7	20,1	153,3
120	18,3	24,3	39,6	854	319	128,1	14,4	11,7	20,9	160,8
130	18,5	25,5	39,9	781	324	130,6	14,6	11,5	21,1	163,2

Таблица 8

Соотношения фракций фитомассы пихтарников Северной Евразии в возрасте 100 лет в связи с индексом континентальности климата

Фракции фитомассы	Индекс континентальности							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Надземная P_{abo} , т/га	269	204	159	127	103	85	71	60
Подземная P_{root} , т/га	48	39	34	30	26	24	22	20
Отношение P_{root}/P_{abo}	0,18	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,30	0,33

к надземной (P_{root}/P_{abo}) в исследованном диапазоне индекса континентальности, напротив, увеличивается с 0,18 до 0,33 в связи с повышением жесткости лесорастительных условий.

Изложенный подход к анализу географии фитомассы в пределах Северной Евразии дает возможность сопоставления биопродуктивности нескольких древесных видов, в частности, пихты и быстрорастущих мелколиственных видов *Populus* (Грибенников, 2002) в пределах совпадения их ареалов. Путем совместного расчета и табулирования (9) и (10) получены возрастные тренды фитомассы *Abies* и *Populus*. Их сопоставление показало, что в одном и том же возрасте насаждения *Populus* во всех регионах, за исключением Причерноморской провинции, превосходят насаждения *Abies* по общей фитомассе на 14-83 % и по надземной – на 10-112 %.

География фитомассы спелых насаждений *Abies*, взятой из региональных таблиц биопродуктивности. Таблицы биопродуктивности, совмещенные с региональными TXP, в отличие от выше упомянутых возрастных трендов фитомассы, отражают локальные особенности возрастной динамики насаждений. В основе таблиц биопродуктивности использованы TXP нормальных и модальных насаждений пихты: для Средне-Европейской провинции в подзоне широколиственных лесов – *A. alba* (Ertagstafeln..., 1983; Козловский, Павлов, 1967; Карпенко и др., 1987; Горюшко, 1987); для Уральской провинции в подзоне южной тайги – *A. sibirica* (Лесотаксационный справочник..., 1991); для Западно-Сибирской провинции в подзоне средней тайги – *A. sibirica* (Поляков, 1966); для Западно-Сибирской провинции в подзоне южной тайги - *A. sibirica* (Красикова, 1975а; Фалалеев, Поляков, 1975а); для Средне-Сибирской провинции в подзоне южной тайги - *A. sibirica* (Фалалеев, Поляков, 1975б; 1975с; 1975г); для Дальнего Востока в подзоне средней тайги – *A. sachalinensis* (Агеенко и др., 1972); для Дальнего Востока в подзоне хвойно-широколиственных лесов – *A. nephrolepis* (Шавнин, 1990); для Алтая-Саянской горной провинции в подзоне южной тайги - *A. sibirica* (Хайтович, 1965; Фалалеев, Поляков, 1975д; 1975е; 1975ж; Красикова, 1975б; Козловский, Павлов, 1967); для Алтая-Саянской горной провинции в подзоне лесостепи - *A. sibirica* (Фалалеев, Поляков, 1975з); для Причерноморской провинции - *A. nordmanniana* (Козловский, Павлов, 1967).

География фитомассы спелых насаждений *Abies*, взятой из возрастных ее трендов. Поскольку в широком экологическом и географическом диапазонах (от европейской России до Забайкалья) в базе данных представлена лишь пихта сибирская, а остальные виды распределены локально в сравнительно узких ареалах, география фитомассы проанализирована для рода в целом. Из упомянутых возрастных трендов взяты показатели надземной и общей фитомассы для возраста 100 лет и проанализированы в связи с природной зональностью и континентальностью климата соответственно по зональному и провинциальному градиентам. Запасы фитомассы в общих чертах соответствуют общей схеме профиля продуктивности (Лавренко и др., 1955). По широтному градиенту профиль продуктивности фитомассы оказался наиболее четко выражен на Японских островах, где фитомасса закономерно нарастает от средней тайги на о. Хоккайдо (*A. sachalinensis*, 120 т/га), далее в подзоне хвойно-широколиственных лесов центральной части о. Хонсю (*A. veitchii*) составляет 160 т/га и наконец в подзоне субтропиков южной части о. Хонсю (*A. firma*) достигает уровня 557 т/га. В Западной Сибири в подзонах средней и южной тайги и в лесостепи общая фитомасса составляет соответственно 126, 224 и 114 т/га. Примечательно, что согласно картосхеме М. И. Будыко и Н. А. Ефимовой (1968), построенной расчетным путем по индексу сухости и радиационному балансу, подзона южной тайги в Западной Сибири выделяется повышенной продуктивностью фитомассы по сравнению с прилегающими регионами Урала и Средней Сибири. Подобная схема прослеживается и по нашим данным для пихтарников: если в подзоне южной тайги Западно-Сибирской провинции общая фитомасса пихтарников составляет 224 т/га, то в той же подзоне прилегающей с запада Уральской провинции – 102 т/га, а в прилегающей с востока Средне-Сибирской провинции – 116 т/га.

Показатели фитомассы, взятые из ее возрастных трендов для возраста 100 лет, сопоставлены по провинциальному градиенту с индексами континентальности, снятыми со схемы ее изолиний (Хромов, 1957). Связь надземной фитомассы пихтарников (P_{abo} , т/га) с индексом континентальности IC описывается уравнением

$$\ln P_{abo} = 5,0908 + 1,1747 (\ln IC) - 0,3016 (\ln IC)^2 ; R^2 = 0,589 \quad (11)$$

и общей фитомассы (P_{tot} , т/га) – уравнением

$$\ln P_{tot} = 5,8731 + 0,7860 (\ln IC) - 0,2409 (\ln IC)^2 ; R^2 = 0,582, \quad (12)$$

которые действительны при $IC > 35-40$. Таким образом, индекс континентальности климата объясняет изменчивость надземной и общей фитомассы пихтарников соответственно на 59 и 58 %.

Результаты табулирования (11) и (12) показывают (табл. 8), что по мере возрастания индекса континентальности от 30 до 100 % происходит последовательное снижение надземной и подземной фитомассы соответственно с 269 до 60 т/га и с 48 до 20 т/га, а отношение подземной фитомассы

Взяты местные ТХР, отражающие весь спектр лесорастительных условий регионов. Регрессионные модели (9) при соответствующих значениях блоковых фиктивных переменных протабулированы по значениям A , N , H , D и M упомянутых ТХР и в результате получены 25 таблиц биопродуктивности нормальных и модальных насаждений рода *Abies* для лесной зоны Северной Евразии (фрагмент одной из них см. в табл. 9).

При анализе составленных таблиц биопродуктивности выявлены существенные различия запасов фитомассы пихтарников по провинциальному градиенту. Показатели как надземной, так и общей фитомассы пихтовых насаждений, взятые из составленных таблиц биопродуктивности при значении возраста 100 лет, оказались коррелированными с индексом континентальности климата, и эта связь описывается уравнениями для надземной фитомассы (P_{abo} , т/га)

$$\ln P_{abo} = -5,3799 + 7,3055 (\ln IC) - 1,1599 (\ln IC)^2; \quad R^2 = 0,798 \quad (13)$$

и для общей фитомассы (P_{tot} , т/га)

$$\ln P_{tot} = -5,7340 + 7,6117 (\ln IC) - 1,2017 (\ln IC)^2; \quad R^2 = 0,796, \quad (14)$$

которые действительны при $IC > 35-40$.

Результаты табулирования (13) и (14) показывают, что по мере возрастания индекса континентальности от 30 до 100 % происходит, как и в предыдущем варианте, последовательное снижение надземной и подземной фитомассы соответственно с 424 до 39 т/га и с 96 до 7 т/га. Показатели надземной и подземной фитомассы, рассчитанные по совокупности ТХР, оказались существенно выше показателей, рассчитанных по базе данных. Это означает, что производительность древостоев сравнительно немногочисленных пробных площадей, заложенных для определения фитомассы, существенно ниже таковой на пробных площадях, заложенных в гораздо большем количестве для составления ТХР.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИТОМАССЫ ПИХТАРНИКОВ ПО РЕГИОНАМ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ

Исследование региональных закономерностей изменения предельных показателей фитомассы выполнено с использованием последовательной «цепочки» взаимосвязанных многофакторных уравнений. Она состоит из четырех звеньев, каждое из которых представляет отдельный этап статистико-регрессионного анализа региональных различий: сначала верхних пределов высоты среднего дерева, затем – верхних пределов диаметра среднего дерева, далее – предельного запаса стволовой древесины и, наконец, – предельных показателей фитомассы:

$$\begin{aligned} H_{max} &= f(X_0, \dots, X_{14}, A, N) \rightarrow D_{max} = f(X_0, \dots, X_{14}, A, N, H_{max}) \rightarrow \\ &\rightarrow M_{max} = f(X_0, \dots, X_{14}, N, H_{max}, D_{max}) \rightarrow \\ &\rightarrow P_{(i) max}/M_{max} \text{ или } P_{(i) max} = f(X_0, \dots, X_{14}, A, N, H_{max}, D_{max}, M_{max}), \end{aligned} \quad (15)$$

где H_{max} и D_{max} – максимальные значения соответственно высоты (м) и диаметра (см) среднего дерева древостоя, отобранные в количестве 2-4 значений из древостоев разной густоты, но одного класса возраста, и аппроксимированные по A и N соответственно с $R^2 = 0,912$ и $R^2 = 0,971$. Остальные два уравнения для M_{max} и $P_{(i) max}/M_{max}$ или $P_{(i) max}$ в системе (15) аналогичны соответственно уравнениям для M в системе (10) и для P_i/M или P_i в (9).

В результате последовательного табулирования рекурсивной системы уравнений (15) различия регионов по запасам фитомассы P_i (при условии равенства массообразующих показателей) наложились на различия по запасам стволовой древесины M_{max} , последние наложились на различия H_{max} и D_{max} по регионам, и в итоге получена иерархия результирующих кривых запасов фитомассы $P_{(i) max}$. В результате каждый класс возраста A характеризуется в логарифмических координатах колоколообразной кривой, их правые ветви пересекаются и точки пересечения образуют огибающую кривую, которая является предельной для данного густотного диапазона по условию самоизреживания и дифференцирована по регионам. Установлено, что предельные показатели фитомассы повышаются по мере снижения густоты и соответствующего увеличения возраста насаждения и достигают максимума при числе деревьев 600-1000 на 1 га как по надземной, так и по общей фитомассе в возрасте около 190 лет.

Сопоставление предельных траекторий (линий самоизреживания) массообразующих показателей и показателей фитомассы с соответствующими траекториями, взятыми из таблиц биопродуктивности «нормальных» пихтовых древостоев, показало, что последние проходят существенно ниже траекторий самоизреживания. Если «нормальная» траектория проходит через значения густоты, близкие к оптимальным, т.е. соответствует чаще всего максимальным значениям продуктивности в каждом возрасте, то предельная при тех же густотах соответствует возрасту, обычно большему на 3-5 классов, и в этом состоит принципиальное различие траекторий фитомассы по предельным и оптимальным густотам.

Предельные значения фитомассы разных фракций, снятые с региональных графиками и нанесенные на схему зонального и провинциального деления территории Северной Евразии показывают те же закономерности распределения фитомассы, что и средние значения, снятые с густотных трендов и взятые из таблиц биопродуктивности для возраста 100 лет: как и в предыдущих случаях, предельные показатели фитомассы снижаются по мере ужесточения климатических условий как в направлении с юга на север, так и в направлении к полюсу континентальности.

Связь предельных значений надземной и общей фитомассы с индексом континентальности климата в пределах всего ареала рода *Abies* в Северной Евразии аппроксимирована уравнениями по надземной фитомассе (P_{abo} , т/га)

$$\ln P_{abo} = 0,5616 + 3,9669 (\ln IC) - 0,6780 (\ln IC)^2; R^2 = 0,847 \quad (16)$$

и по общей фитомассе (P_{tot} , т/га)

$$\ln P_{tot} = 5,0588 + 1,6663 (\ln IC) - 0,3753 (\ln IC)^2; R^2 = 0,837. \quad (17)$$

которые действительны при $IC > 35-40$.

Результаты табулирования уравнений (16)-(17) показывают (табл. 10), что по мере возрастания индекса континентальности от 30 до 100 % происходит, как и в предыдущих вариантах, последовательное снижение предельных показателей надземной и подземной фитомассы соответственно с 498 до 86 т/га и с 95 до 33 т/га, но их соотношение в исследованном диапазоне индекса континентальности, напротив, увеличивается с 0,19 до 0,38 в связи с повышением жесткости лесорастительных условий.

Таблица 10
Соотношения предельных показателей фракций фитомассы пихты в связи с индексом континентальности климата

Фракции фитомассы	Индекс континентальности							
	30	40	50	60	70	80	90	100
Надземная P_{abo} , т/га	498	391	300	230	177	138	108	86
Подземная P_{root} , т/га	95	54	42	38	36	35	34	33
Отношение P_{root}/P_{abo}	0,19	0,14	0,14	0,16	0,21	0,26	0,32	0,38

6. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ О ФИТОМАССЕ ПИХТАРНИКОВ НА ЛЕСОПОКРЫТУЮ ПЛОЩАДЬ РЕГИОНА (на примере Невьянского лесхоза Свердловской области)

Регрессионные модели фитомассы (9) совмещены с данными ГУЛФ с целью расчета запасов фитомассы пихты на лесопокрытой площади. Использовали алгоритм В. А. Усольцева (1998) и программу А. А. Сальникова (Сальников, Усольцев, 1999) для экстраполяции уравнений фитомассы на площадь, занимаемую пихтой в Невьянском лесхозе Свердловской области – 855 га. Это значение включает в себя суммарную площадь выделов с фактическим участием пихты независимо от состава пород и превышает площадь пихтовой хозсекции, выделяемой по преобладающей породе. Подобный прием сортировки повыделочного банка данных без предварительного выделения хозсекций принят с целью обеспечения возможности последующего суммирования запасов фитомассы всех пород и получения суммарной характеристики выделов по запасам фитомассы.

Установлено, что в общей фитомассе пихты на выделах с ее участием в Невьянском лесхозе - 26977 т на долю стволов, корней, ветвей, хвои и нижних ярусов приходится соответственно 62, 11, 14, 9 и 4 %. По классам бонитета (I, II, III и IV) общая фитомасса распределена в соотношении соответственно 1, 36, 61 и 2 %, по группам полнот (0,4; 0,7 и 1,0) – соответственно 4, 90 и 6%, по классам возраста (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII) – со-

ответственно 1, 7, 9, 20, 12, 33, 10, 8 %. На 1 га лесопокрытой площади лесхоза с участием пихты на долю последней приходится 31,5 т общей (надземной и подземной) фитомассы. Суммирование повыделочных запасов фитомассы всех лесообразующих пород лесхоза дает фактические запасы фитомассы на его площади. Выполнение подобных расчетов для всех лесхозов уральского региона дает возможность составить картосхему запасов фитомассы (углерода) для всей территории. Дифференцированные по регионам регрессионные модели фитомассы, введенные в совмещенную базу данных ГУЛФ, дают дополнительно к традиционному таксационному описанию каждого выдела показатели фитомассы по фракциям.

ВЫВОДЫ

1. В пихтарниках южной тайги на Среднем Урале у деревьев одного и того же диаметра по мере снижения высоты дерева масса кроны возрастает, но только для ступеней толщины стволов от 8 до 20-24 см. При больших диаметрах стволов фитомасса кроны и при всех диаметрах – масса стволов возрастают по мере увеличения высоты дерева. Наибольшими запасами хвои характеризуется пихта сибирская на Урале (9,2 т/га), а по регионам Сибири этот показатель ниже – в среднем 7,2 т/га. Наибольшей массой хвои отличаются пихта белая в Средней Европе (13,2 т/га) и пихты, произрастающие на Японских островах (12,3-18,2 т/га).
2. Составление таблиц биопродуктивности насаждений с использованием материалов, опубликованных, но не доведенных исследователями до уровня норматива, перспективно для регионов, где таких таблиц нет.
3. На основе сформированной базы данных о фитомассе пихты Евразии, рассчитана многофункциональные модели фитомассы, совмещенные: а) с возрастными трендами массообразующих показателей, полученными только по материалам сформированной базы данных пробных площадей, что позволит установить региональные закономерности распределения фитомассы; 2) с основными региональными ТХР или интенсивности фитомассы насаждений; 3) с предельными траекториями массообразующих показателей насаждений с целью оценки потенциальных возможностей для понижения углерода лесными экосистемами и 4) с новейшим банком данных ГУЛФ. Фитомасса пихтарников снижается по мере ухудшения климатических условий по зональному и провинциальному градиентам, при этом отношение подземной фитомассы к надземной возрастает.
4. Впервые в пределах ареалов основных видов пихты составлен комплекс нормативов,ключающий в себя 25 таблиц биологической продуктивности, необходимых при лесоустройстве, а также при расчетах углеродного бюджета лесных экосистем Северной Евразии и оптимизации систем экологизированной рукою по максимуму углерода, депонируемого лесной экосистемой после из пропеления.